送電線からのレーダ反射信号の解析

山田 多津人*・水井 真治**・岩崎 寛希***

Signal Analysis of Radar Echoes from the Overhead Power Cable

Tatsuto YAMADA, Sinji MIZUI and Hiroki IWASAKI

Abstract

The authors previously tried to formularize the signal intensity of the radar echoes from the overhead power cable above *Kurushima Kaikyo* Channel and from the small fishing craft and pleasure boats along the Channel. And we consequently reported the difference of features and the similarities of the echoes by comparative evaluation in fixed quantity regarding the space distribution of the echoes. In this study, we review the detailed formularization of radar signal intensity of the cable with the data from other sea area, and the following results have been found.

- 1) It is effective to find the length of power cable related to the reflection by the model gained as the size of the first Fresnel zone than by the length gained with the horizontal beam width as a function.
- 2) The changes of signal intensity with actual data can be explained by the model considering the influence of cross protection between the reflection waves by sea clutter and the actual waves.
- 3) The proposed model is versatile without locality of sea area.

Keywords : Radar, Radar signal intensity, Overhead power cable, Maritime traffic safety, Fresnel zone

キーワード: レーダ, レーダ信号強度, 送電線, 海上交通安全, フレネル領域

1. はじめに

瀬戸内海に存在する多数の島々の間には海峡を跨ぐ形で送電線が架設されている場合があり、船舶が送電線下を通航する機会が多い。著者らは先に来島海峡航路上空（西水道）に架設されている送電線のレーダ映像と同海域にある小型漁船やプレジャーボートのレーダ映像について、モデル化と実際の海域における反射信号の解析を通じて、両映像の信号強度と信号の空間分布の比較による特性を明らかにすると共に、定量的な比較評価を行い、映像の類似性について報告した⁽¹⁾。しかしながら、送電線からのレーダ反射信号強度のモデルの検証については、来島海峡における実測データのみで、限定された海域

であり、地域性の影響について払拭できていなかった。また、検討に用いたデータ数が限られていたため、変動成分を考慮した検証等が十分に実施できていなかった（船舶交通が輻輳する海域であったため、船を停留させてデータを取得することが困難であったこと等による）という課題があった。このため今回は、他船交通の少ない海域（豊島と上蒲刈島間）において、船を同一地点に停留させながら、一定時間、データを取得することとし、この様に取得した実データにより、送電線のレーダ反射断面積（Radar Cross Section、以下、「RCS」という）の表現方法を中心にモデルの再検証を行った結果、地域性による影響は無いこと（すなわち、モデルについて汎用性

* 正会員 海上保安大学校（〒737-8512 広島県呉市若葉町 5-1） yamada@jcga.ac.jp

** 正会員 広島商船高等専門学校（〒725-0231 豊田郡大崎上島町東野 4272-1）mizui@hiroshima-cmt.ac.jp

*** 正会員 大島商船高等専門学校（〒742-2193 大島郡周防大島町大字小松 1091-1）iwasaki@oshima-k.ac.jp

があること)が確認できた。また、直接波と海面反射波の干渉による影響を考慮したモデルによる検証も行い、一定の知見を得たので報告する。

2. 送電線からの反射信号強度

2.1 送電線からの反射信号強度のモデル化⁽¹⁾

Fig.1 に送電線とレーダ位置の関係を示す。送電線からの反射信号強度 (P_r) は以下の事項を考慮する必要がある。

- ① 送信電力の効果 (P_t)
- ② RCS を 1 m^2 とした時の主損失 (L_m)
- ③ レーダアンテナの垂直面の指向性効果 (L_v)
- ④ 直接波と海面による反射波の干渉効果 (G_s)
- ⑤ 送電線の RCS の効果 (G_σ)
- ⑥ その他効果 (L_r)

以上より、送電線からの反射信号強度 (P_r) は次式で表せる (dB 表記による)。

$$P_r = P_t + L_m + L_v + G_s + G_\sigma + L_r \quad (1)$$

また、上記①～⑤の効果や損失は以下の式により表せる。

$$P_t = 10 \log_{10}(p_t) \quad (2)$$

$$L_m = 10 \log_{10} \left(\frac{G_t^2 \times \lambda^2}{(4\pi)^3 \times R^4} \right) \quad (3)$$

$$L_v = 10 \log_{10} \left(\frac{p}{p_{\max}} \right) \quad (4)$$

$$G_s = 12 + 40 \log_{10} \left\{ \sin \left(\frac{2\pi \times h \times H}{\lambda \times R} \right) \right\} \quad (5)$$

$$G_\sigma = 20 \log_{10}(l) + 10 \log_{10} \left(\frac{C^2 \times r^2}{k^2 \times k'^2 \times \lambda^2 \times \pi} \right) \quad (6)$$

但し、 p_t : レーダの送信電力 (mW)、 G_t : アンテナ利得、 R : 物標までの距離 (m)、 λ : 波長 (m)、 H : 送電線の高さ (m)、 h : レーダアンテナ高さ (m)、 C : アンテナ効率により定まる値、 k : 水平面のアンテナ定数、 k' : 垂直面のアンテナ定数、 r : 送電線の半径 (m)、 l : 反射に係わる送電線の長さ (m) とする。また、レーダアンテナの垂直面のビームパターン (p) はレーダの線状開口分布に近い分布を採用し⁽²⁾、 $p_{\max}$ はその最大値である。なお、 p は次式で示される。

$$p = \left(\frac{\sin(u/2)}{u/2} \right)^8 \quad (7)$$

$$\text{但し、} u = \frac{\pi \times b}{\lambda} \times \sin \alpha$$

α をアンテナから送電線を望む仰角、 b をアンテナの縦方向の開口長 (m) とする。

Fig.1 Geometric relation for computing between overhead power cable and antenna position

その他効果 (L_r) については、前報⁽¹⁾では、給電損失や信号処理による損失等の一定な効果ととらえたが、変動成分を含むモデルの検証という本研究の目的から再検討を行い、船体の運動による影響や複数条ある送電線の相互効果による影響等による不規則な変動成分を併せた要素とした。

2.2 送電線の RCS の効果の表現

送電線はアルミニウムをより合わせた線形状であり (アルミニウムの素線を同心円状により合わせている)、船舶等と比較すると単純な形状をしている。このため、送電線の RCS (σ) は、送電線をアンテナと考えたときの開口面積 (A_p) とアンテナ利得 (G_p) の積と置き換えることができるものと考え、(6) 式のような表現を行った⁽¹⁾。(6) 式の第一項において、反射に係わる送電線の長さ (l) は、レーダから送電線までの距離により変動する成分であり、第2項は定数項である。このことから、送電線の信号強度のモデル化においては、 l を表現する方法が重要となる。例えば、橋梁によるレーダ偽像シミュレーションでは、レーダビームの照射範囲において、反射に関係する大きさをどのように捉えるかという問題に対して、水平ビーム幅の関数として求める方法⁽⁴⁾と第一フレネル領域の大きさとして求める方法⁽³⁾がある。送電線に関して、著者らの前報⁽¹⁾では、第一フレネル領域の大きさとしたモデル化のみで検討を行った。今回、モデルの妥当性を再検証するために、橋梁によるレーダ偽像シミュレーションの場合を参考として、反射に係わる送電線の長さを、水平ビーム幅の関数として求める場合と第一フレネル領域の大きさとして求める場合の2つのケースで比較することとした。

水平ビーム幅 (θ_h) の関数として与える場合は、

$$l = 2 \times R \times \tan(\theta_h / 2) \quad (8)$$

となる。また、第一フレネル領域の大きさとして与える場合は次式となる。

$$l = 2 \times \sqrt{\frac{\lambda \times R}{2}} \quad (9)$$

2.3 距離による干渉効果の影響

直接波と海面反射波の干渉効果は、送電線までの距離が近いほど、距離の変化量に対する信号強度の変動が大きい。また、実海面での観測においては、気象・海象や船体運動の影響によりレーダアンテナ高さが変化すること等から、干渉効果による影響が不規則な変動性を示すことや複数条ある送電線の相互効果による影響等もあると推測される。一方、不規則な変動成分は存在するものの、送電線からの距離が遠くなる程、距離の変化量に対する信号強度の変動が小さくなり、干渉効果による周期的な変動成分は実データによって捉え易くなると考えられる。このため、3.に示す今回の観測では、この傾向を捉えることが可能な距離で、かつ、送電線の反射信号強度のデータが十分に得られる条件での観測実施・データ処理を計画・実施した。

3. 観測結果の検討及び考察

3.1 レーダ観測等の概要

平成 20 年 11 月 18 日 (火)、上蒲刈島 (呉市蒲刈町) と豊島 (呉市豊浜町) を繋ぐ橋長約 903m の豊島大橋が開通した (この架橋は、本州と芸予諸島を結ぶ 8 つの安芸灘諸島連絡架橋のうちの一つである)。送電線のレーダ観測は、この豊島大橋の橋梁完成後に、橋梁が船舶のレーダ映像に与える影響を調査するために行われた観測⁽⁵⁾に合わせて実施した。レーダ観測は、平成 20 年 9 月 21 日 (日) 11:00 から約 3 時間行った。(当日は小潮で、満潮時刻は 13:30 頃であった。) なお海図から、送電線の海面上高さは 47m であり、豊島大橋の海面上高さは約 50m である。このため、豊島大橋北側海域でも橋梁の中央付近では、橋梁よりも低い位置に送電線があるため、レーダに送電線の映像が現われる。Fig.2 に海域の概要と南側海域から見た対景図を示す。対景図中の破線は送電線の配置状況の概略を示している。観測地点は豊島大橋を中心として約 400m 毎の同心円上の南北海域に設定した。

観測に使用した船舶は広島商船高等専門学校に所属する小型練習船「ひかり」であり、使用したレーダは同船に設置されている X バンドレーダである。

Table 1 Major dimension of 'HIKARI' and specification of radar

Gross tonnage	16 tons
Length over all	17.4m
Moulded breadth	4.1m
Height of radar antenna	3.6m
Transmission power	10kw
Transmission frequency	9410MHz±30MHz
Horizontal beam width	1.2°
Vertical beam width	22°
Pulse length	0.08 μs
Pulse repetition frequency	2000Hz
Revolution per minute of antenna	24rpm
Sampling frequency	50MHZ

Fig.2 Aerial layout and side views of observation area

レーダの受信信号の測定には、指示部の利得調整の影響を受けずに反射信号強度の測定が可能なレーダ映像記録装置⁽⁶⁾等を使用した。本装置では、レーダアンテナ約 1 回転分のレーダ映像を内部メモリからハードディスクに転送する時間が、観測時間も含めて約 18 秒であったことから、レーダ映像データは約 18 秒間隔で記録した。Table 1 に「ひかり」の諸元及びレーダの使用状況等を示す。

観測の結果、南側海域で 125 個、北側海域で 159 個のデータを解析対象として抽出したが、送電線に最も近距離となる南側海域の観測点では、降雨による影響等、観測時の制限から十分なデータ数を得ることができなかった (7 個)。

Fig.3 Radar echoes from the power cable

Fig.4 Measured signal intensity and theoretical value of the overhead power cable

3.2 送電線の RCS による効果の比較と考察

Fig.3 に送電線からのレーダ反射信号の空間分布の状況を一例として示す。記録した全てのデータから送電線の映像を抽出し、各映像の信号強度の最大値を当該送電線映像の反射信号強度とした。Fig.4 には、このように取得した送電線からのレーダ反射信号強度の実測データを示す。同図中、反射に係わる送電線の長さを、第一フレネル領域の大きさとして与える場合を太い実線 (Fresnel) で、水平ビーム幅を関数として与える場合を細い実線 (Beam width) で示してある。なお、(1) 式において、直接波と海面による反射波の干渉効果については、別に検討することとして、ここではその効果は入れていない。また、送電線の RCS の効果内の定数項及びその他効果の内、不規則な変動をしない成分を合わせたものは、一定な効果 (損失または利得) と捉えることができるので、前報同様に、同図ではこの値を -25dBm

Table 2 Comparison of average signal intensity and theoretical value

	Range (m)	Average (dBm)	Fresnel (dBm)	Beam width (dBm)
N	547	-47.4	-50.7	-53.3
	973	-56.9	-57	-57.6
	1335	-61.4	-61.5	-60.2
	1735	-64.2	-64.8	-62.4
S	633	-54.0	-52.3	-54.3
	1027	-58.6	-58.2	-58.1
	1488	-64.8	-62.9	-61.1
The sum of squared residuals			17.88	53.75

Fig.5 Comparison of average signal intensity and theoretical value

とした場合を示してある。

送電線による RCS の効果 ((8)式及び(9)式による違い) を比較するために、まず、図中の各実測データについて、南北海域ごとに、送電線までの距離が同程度のグループにまとめて (但し、データ数が少ないため、最も送電線に近い測定地点のデータは除外した)、各グループの平均距離 (m) と平均信号強度 (dBm) を求め (変動成分を除いたデータとし)、最小二乗法によって両モデルに最も適合する (残差が最も小さくなる) 一定な効果を推定した。次に、モデルによる信号強度と実測データの平均信号強度との残差の大きさ等で両モデルの比較を行った。なお、反射信号強度はレーダ受信機からの出力電圧を A/D 変換して取得しているが、事前に基準信号発生器によって校正を実施し、dBm 値と出力電圧は、ほぼ直線性があることを確認しており、平均処理することに問題はない。

当該結果を Table 2 と Fig.5 に示す。Table 2 の「N」及び「S」は、観測海域の北側 (N) 及び南側 (S) を示している。反射に係わる送電線の長さを、第一

フレネル領域の大きさとして求める場合と水平ビーム幅の関数として求める場合では、両モデルとも比較的良好な一致を示しているが、Table 2 に示す通り、第一フレネル領域の大きさとする方が残差は小さく、Fig.5 から実測データの平均値との適合性が良いことが分かった。但し、3.3 で述べる干渉効果による周期的な変動成分の影響を完全には除去できていないことから、どちらのモデルがより適合性が良いかについては、更なる検討が必要である。以上から、送電線の RCS の効果において、変動成分を考慮しないモデルとした場合（平均的な信号強度）について、前報ではモデルと実測データの適合性について、変化の傾向を主観的な判断により行った⁽¹⁾のみであったが、今回、測定地点（送電線までの距離が同程度のグループ）ごとの平均信号強度と平均距離により、モデルとの比較を実施した結果、送電線の RCS の効果等を考慮したモデルについて妥当性があることが客観的な指標値により検証できたと考える。また、この時の一定な効果量としての損失を送電線の長さをフレネル領域とする場合が -22.2dBm 、水平ビーム幅の関数として求める場合が -30.6dBm として見積もることができた。

加えて、Table 2 と Fig.5 においては、各データを南北海域に分けて示しているが、北側海域は送電線の手前に豊島大橋があり、送電線に対するレーダ波の伝搬路内の状況が南側海域と北側海域では違いがある。しかしながら、平均信号強度によって比較する限り、若干ではあるが北側海域の方が、強めの値を示している傾向あるものの、極端に大きな差異は見られないことから、橋による影響は殆ど無いものと考えられる。

3.3 干渉効果による影響の比較と考察

3.2 においては変動成分を考慮しないモデルであったが、本節では、反射に係わる送電線の長さを、第一フレネル領域の大きさとし（3.2 の結果から、より残差の小さいモデル）、また、損失を -22.2dBm とした場合に、直接波と海面反射波の干渉効果による影響を加え、実測データと比較した。当該結果を Fig.6 に示す。送電線から約 900m よりも至近では、干渉による変動は距離変化に対して大きくその周期的な変動傾向は捉え難い。一方、約 900m 以遠では、一般的な傾向として、モデルの信号強度の変動傾向（海面反射による反射波と直接波の干渉効果による変動）との対応関係に比較的良好な一致を示している部分も多くあり、干渉効果を加えたモデルにより送電線からの反射信号強度を表現できるものと

Fig.6 Comparison of actual signal intensity and theoretical value

考える。しかし、Fig.6 の実測データの一部には、モデルよりも強い反射信号強度を示すデータや逆に弱い反射信号強度を示すデータがあること、また、同一距離でも信号強度の強弱に比較的大きな差がある場合もあることから、海面反射による反射波と直接波による干渉効果以外に、2.1 の⑥に挙げた、その他の効果の内、不規則な変動要素が影響している可能性が伺われる。この点については、モデルの改善事項として今後の課題となるものと考えられる。

3.4 前報⁽¹⁾の結果を加えた考察

前報では来島海峡航路西水道上空に架設されている送電線高さ 75m の場合であり、今回は豊島大橋南側に架設されている送電線高さ 47m の場合であった。送電線の高さは、レーダアンテナの垂直面の指向性効果及び直接波と海面による反射波の干渉効果に密接に関わる要素である。前報での結果に加え、3.2 での平均的な信号強度による比較検討の結果、また、3.3 での干渉効果による変動成分を加えたモデルについての検討結果から、異なる海域での評価（実測データによる検証）を通して、送電線の高さをパラメータの一つとして持つ提案するモデルについて、地域性は無く、モデルの妥当性が検証できたものと考えられる。

4. まとめ

送電線の反射信号強度のモデル化について、前報では種々の制約から十分に検討できなかった事項や仮定条件としていた制限事項について、別海域での実測データを基に新たに検討を行った結果、以下

の通り知見を得た。

- (1) 反射に係わる送電線の長さを、第一フレネル領域の大きさとして求める場合と水平ビーム幅の関数として求める場合について比較した結果、両モデルとも比較的良好一致を示したものの、前者の方が実測データとの適合性が良かった。但し、干渉効果による周期的な変動成分の影響についての検討に課題がある。
- (2) 最小二乗法により損失量を推定できた。また、干渉効果を考慮したモデルと実測データを比較した結果、送電線までの距離が約 900m 以遠では、比較的良好対応関係を示している。
- (3) 以上から、前報で提案したモデルを基礎に、新たな検討を行った結果、海域による地域性の影響は無く、提案するモデルには汎用性があることが確認できた。

5. おわりに

これまで著者らは、来島海峡航路と蒲刈島～豊島間に架設されている送電線からのレーダ反射信号データを用いて検討を行ってきたが、瀬戸内海には島々を結ぶ送電線が他にも多くある。今後機会があれば、更に実測データに基づく検討を実施し、3.3でも示した不規則な変動要素のモデル化を含む、モデルの改善等を図りたいと考えている。また、今回の検討では、送電線までの距離が約 1 海里以内ではあるものの、反射に係わる送電線の長さを、第一フレネル領域の大きさとして求める場合と水平ビーム幅の関数として求める場合について実測データとの比較検討を行ったが、このような研究はこれまでに殆ど無いと考える。干渉効果による周期的な変動成分の影響についての検討に課題もあるので、送電線以外のターゲット（レーダビームの照射範囲よりも物理的な大きさが大きいもの）も検討対象として、両モデルの適合性等についても検討を実施したいと考えている。

謝辞

本研究の実施に当たり、多くの貴重なご助言等を頂いた、故佐藤尚登先生に深く感謝致します。また、同様にご指導を賜った、海上保安大学校名誉教授の竹中康雄先生、実験にご協力頂いた、(社)瀬戸内海海上安全協会、広島商船高等専門学校の関係各位、今西邦彦技術顧問 ((社)日本船長協会) 及び㈱中電技術コンサルタントの関係各位に感謝致します。

参考文献

- (1) 山田多津人、水井真治、佐藤尚登、竹中康雄：来島海峡における送電線と小型船のレーダ反射信号の解析、日本航海学会論文集、第 115 号、pp.59～65、平成 18 年 9 月
- (2) 吉田孝他：レーダ技術、pp.120～124、コロナ社、1976
- (3) 竹中康雄、佐藤尚登：橋梁等におけるレーダ波の反射並びに偽像予測シミュレーションの改善について、日本航海学会論文集 80 号、pp.69～80、1989.3
- (4) 日本海難防止協会：架橋が船舶レーダー映像に及ぼす影響調査報告書、昭和 52 年 3 月
- (5) 広島県道路公社、瀬戸内海海上安全協会：豊島大橋架設に伴う航行安全対策調査研究報告書【5】、平成 21 年 1 月
- (6) 竹中康雄、山田多津人：レーダ映像記録装置の開発研究、海上保安大学校研究報告、第 43 巻、第 1 号、pp.1～12、1998

質疑応答

新井康夫（海技大学校）：

1. 本研究の目的で送電線と小型漁船とのレーダ映像の形状の違いが挙げられていましたが、それについてどのような結果が得られたかを説明して下さい。
2. 反射レベルのモデルについて、フレネルゾーンとビーム幅とで計算した場合の評価の結果、フレネルゾーンを用いた際の方がより適合していることについて、定性的な説明を簡単にして下さい。

山田多津人：

1. 前回は多数の漁船等の映像も取得し、送電線と小型船のレーダ映像の形状（広がり角度）について比較検討した結果、類似性があることを示しました。今回は観測海域に漁船等が少なく漁船等の映像との比較は実施できませんでした。
2. 反射に関わる長さをフレネルゾーンとする場合は、レーダ波の送電線への照射を球面波と捉えることに相当し、ビーム幅とする場合は平面波と捉えることに相当します。レーダビームの放射範囲に比較して、大きな（長い）ターゲットについては、近距離においては、レーダ波を球面波と捉える方がより適切であったため、フレネルゾーンを用いたモデルの方がより良い適合性を示したものと考えます。